

شعبة العلوم
التجريبية

BAC

5

العلوم الطبيعية

المجال المعرفي الثاني

تمهيد

التحولات الطاقوية في الخلايا

لقد لاحظنا في الوحدات السابقة للمجال الأول أن تركيب البروتينات تحتاج إلى طاقة تحصل عليها خلايا العضوية من جزيئات الـ ATP وعندما تدخل في مختلف التخصصات مثل عمل الإنزيمات والنقل العصبي والدفاع عن العضوية والحركة ... تحتاج أيضا إلى طاقة.

فما مصدر هذه الطاقة؟ وكيف يتم تحويلها لتشكيل جزيئات الـ ATP؟

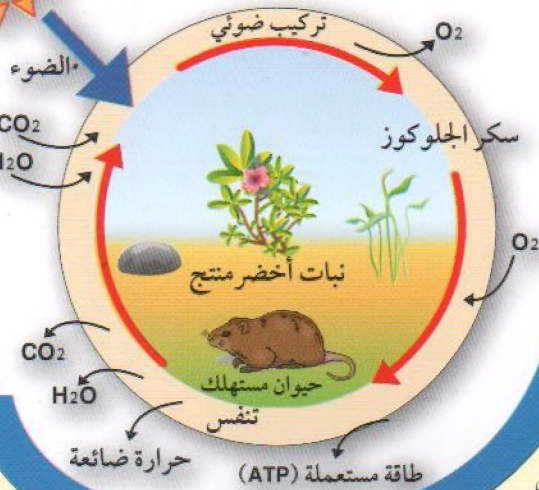
تذكير بالمكتسبات القبلية:



يخص المخطط التالي تدفق الطاقة الضوئية والتي مصدرها الشمس عبر الكائنات الحية انطلاقا من النباتات الخضراء التي تحولها إلى طاقة كيميائية كامنة بتركيب مادة عضوية تسمى السكريات (تركيب ضوئي)، انتهاء بالحيوانات والتي تقوم بتحويل هذه الطاقة الكامنة إلى طاقة قابلة للاستعمال في شكل ATP (تنفس). سنتناول بشكل تفصيلي مراحل هاتين الآليتين.

تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية
كامنة (تركيب ضوئي):

يوضح الجدول الموالي بشكل تفصيلي مراحل وشروط هذه الظاهرة على المستوى الجزيئي:



التفاصيل

المراحل

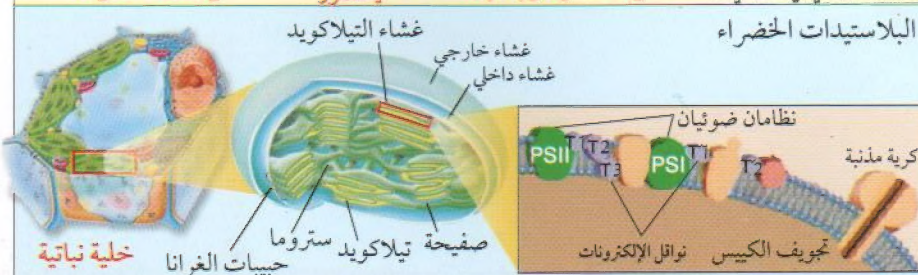
تذكير بالمكتسبات القبلية:

تتمثل المظاهر الخارجية للتركيب الضوئي في أخذ ثاني أكسيد الكربون من الجو الخارجي وبالمقابل طرح الأكسجين. يرافق ذلك بتركيب السكريات. وتتم العملية في وجود الضوء واليخضور، وفق المعادلة التقليدية التالية:

البلاستيدات الخضراء

1
إيضاح المظاهر
خارجية وشروط
حدوثها

2
المقر والبنية

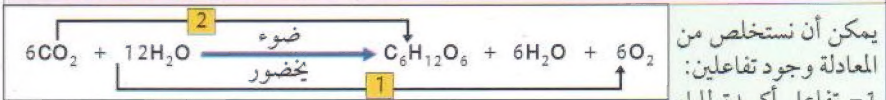


يتبين من الشكل أن الخلية النباتية تتميز بوجود الصانعات الخضراء إلى جانب احتوائها على كل مكونات الخلية بما فيها الميتوكوندري.

تتكون البلاستيدة الخضراء من غشائين: داخلي وخارجي. بداخلها انشاءات أفقية للأغشية (صفائح) تحصر بينها حبيبات الغرانا. تتكون كل حبيبة غرانوم من مجموعة من كيبسات متراكبة يسمى كل منها تيلاكويد.

ما فوق بنية التيلاكويد

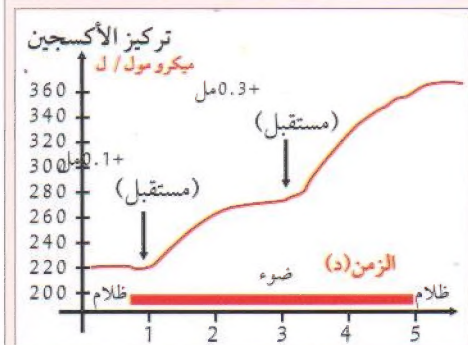
يتكون غشاء التيلاكويد من النظامين الضوئيين PSI و PSII يحصران بينها سلسلة نواقل الإلكترونات تنتهي بكرة مذنب تعرف ب ATPase. تسمى هذه العناصر الغشائية في مجملها **السلسلة التركيبية الضوئية**.



يمكن أن نستخلص من المعادلة وجود تفاعلين: 1- تفاعل أكسدة للماء

حيث يتفكك إلى بروتونات وإلكترونات وأكسجين يطرح إلى الخارج.

2- تفاعل إرجاع لغاز الفحم إلى جلوكوز. فالعملية تتطلب امتصاص غاز الفحم من الوسط الخارجي. أي أن طبيعة التفاعلات الكيميائية في التركيب الضوئي هي تفاعلات **أكسدة وإرجاع**. تشتط المرحلة الأولى وجود الضوء واليخضور، لذلك تسمى المرحلة الضوئية أو الكيموضوئية. أما المرحلة الثانية فتشتط غاز الفحم دون الحاجة إلى الضوء لذلك تسمى المرحلة الظلامية أو الكيموحوية.



أ- تفاعلات المرحلة الكيموضوئية
يوضح المنحنى التالي نتائج تجارب مدعمة بالحاسوب لمعلق التيلاكويد معرض للضوء والظلام وضع فيه كاشف الفيروسيانور كمستقبل للإلكترونات (يكون بلون بني محمر في الحالة المؤكسدة، وبلون أخضر في الحالة المرجعة). حيث نلاحظ زيادة كمية الأكسجين المنطلق بزيادة كمية الفيروسيانور في وجود الضوء. - لكن ما علاقة الأكسجين المنطلق بإرجاع الفيروسيانور؟

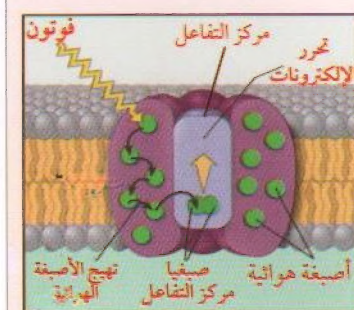
الأكسجين المنطلق	الجزئ المشع	الوسط
غير مشع	CO2	الأول
مشع	H2O	الثاني

مصدر الأكسجين المنطلق:
نبين ذلك من خلال تجربة هيل الشهيرة: وضع معلق الكلوريل في وسطين أحدهما يحتوي على CO2 ذي أكسجين مشع بينما الماء غير مشع، والوسط الثاني يحتوي على H2O ذي أكسجين مشع بينما CO2 غير مشع. نتائج هذه التجارب موضحة في الجدول:

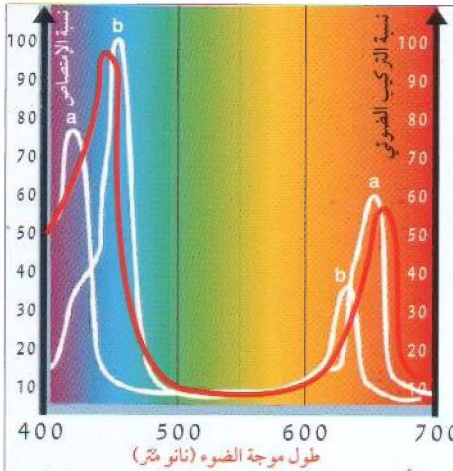
يتبين من خلال هذه النتائج أن مصدر الأكسجين هو الماء. وعليه فإن إرجاع الفيروسيانور يتم بتحليل الماء إلى أكسجين وبروتونات وإلكترونات تعمل على إرجاع الفيروسيانور كما يلي:



دور الضوء واليخضور:



يتكون النظام الضوئي من الأصبغة اليخضورية وهي A و B وأشباه الكاروتين وهي تنظم في شكل أصبغة هوائية ومركز التفاعل. تلتقط الأصبغة الهوائية الفوتونات التي تعمل على تهيج أول صبغة P1 تنتقل فيها الإلكترونات من مستوى أدنى إلى مستوى أعلى. عند عودة الإلكترون إلى مستواه الأول تتحرر طاقة تنتقل إلى الصبغة المجاورة P2 فتتهيج بدورها بنفس الكيفية. وهكذا تندلع سلسلة من التهيجات على مستوى هذه الأصبغة الهوائية إلى أن تصل الطاقة إلى زوج نهائي من الأصبغة يسمى **مركز التفاعل** حيث بعد تهيجها يتحرر إلكترونين كما يبينه الشكل المقابل:



3- يقوم أحد نواقل الإلكترونات بضخ البروتونات في تجويف الثيلاكويد إلى جانب تحلل الماء داخل هذا التجويف مما يزيد من تركيزها وتنخفض قيمة ال PH. إن تراكم البروتونات في تجويف الثيلاكويد يعمل على إحداث فرق في تركيزها على جانبي غشاء الثيلاكويد. وحسب نظرية ميتشل **الكيمواسموزية** والتجارب التي أكدتها فإن هذه البروتونات تخرج من التجويف نحو الحشوة، لكن ذلك لا يكون إلا عبر الكريات المذنية مما ينتج عنه عملية فسفرة تسمى الفسفرة الضوئية تنتهي بتشكيل جزئيات ال ATP.

- لماذا نرى النباتات بلون أخضر؟

يتكون الضوء الأبيض (ضوء الشمس) من 7 ألوان مختلفة تسمى ألوان الطيف وهي عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية كل لون يحمل طول موجة معينة أقصرها البنفسجي والذي طول موجته 400 نانومتر ، وأطولها اللون الأحمر والذي طول موجته 700 نانومتر. يبين الشكل أعلاه منحنى نسبة امتصاص الألوان المختلفة من طرف اليخضور A وB فنلاحظ أنها تكون عالية في الألوان ذات الأمواج القصيرة (وهي البنفسجي والأزرق) وبنسبة أقل عند الموجات الطويلة (وهي البرتقالي والأحمر)، وشبه معدومة في اللون الأخضر. ويوضح المنحنى باللون الأحمر نسبة التركيب الضوئي حيث هناك توازي مع منحنى الإمتصاص أي كلما زاد الإمتصاص زاد التركيب الضوئي والعكس صحيح. وهذا هو تفسير سبب رؤية أوراق النباتات بلون أخضر لأنها تعكسه ولا تمتصه. وبالتالي فأنت ترى شيئاً بلون معين هذا يعني أنه امتص كل ألوان الطيف ماعدا ذلك اللون. ويمكن أن يكون لون الشيء مزيجاً من لونين وهذا يعني بأنه لا يمتص اللونين معاً.

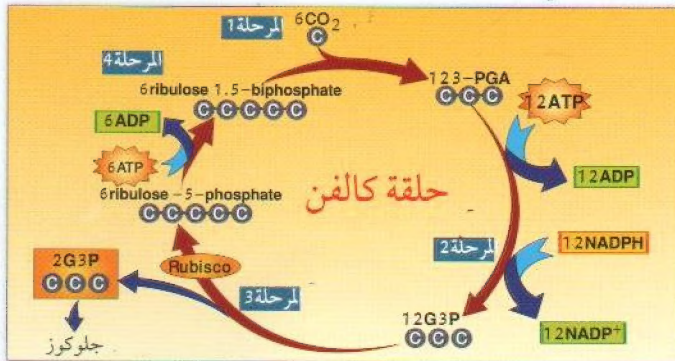
حصيلة التفاعلات الكيموضوئية:



- ماهو مصير NADPH2؟

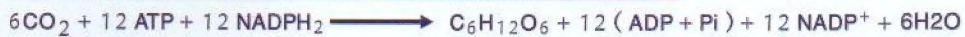
ب- تفاعلات المرحلة الكيموحيوية

على مستوى الحشوة أو ستروما تحدث سلسلة من التفاعلات يتم فيها إدماج CO_2 وإرجاع مركبات بينية عن طريق NADPH_2 واستعمال طاقة ليتشكل في النهاية الجلوكوز. يتم إدماج 6 جزئيات من غاز الفحم ب 6 جزئيات لمركب خماسي يسمى Rudip ($\text{Ribulose 1.5-Diphosphate}$) لتعطي كمرحلة أولى 12 جزئياً PGA (حمض Phosphoglycerique) تتم فسفرته باستعمال ATP ثم إرجاعه عن طريق NADPH_2 ليتشكل مركب PGA (Phosphoglyceraldehyde) كمرحلة ثانية حيث يكون عدد جزئياته 12 بعدد 36 ذرة كربون. وفي المرحلة الثالثة تندمج جزئيتان من PGA إلى جلوكوز، والباقي يندمج في شكل 6 جزئيات ريبيلوز أحادي الفوسفات. وفي المرحلة الرابعة والأخيرة يسترجع مركب Rudip من جديد لتستأنف الدورة مع 6 جزئيات CO_2 أخرى. يطلق على العملية **حلقة كالفن** والتي يوضحها المخطط التالي.



حصيلة المرحلة الكيموحيوية:

كما لاحظنا سابقاً إنها عملية إرجاع CO_2 لتركيب سكر الجلوكوز وهي تشترط وجود CO_2 و ATP و NADPH_2



ما هي العلاقة بين المرحلتين؟

تشترط المرحلة الكيموحيوية وجود الضوء بطريق غير مباشر بمعنى وجود الضوء من أجل تزويدها ب: ATP و NADPH_2 من المرحلة الكيموضوئية. وكذلك فإن استمرار المرحلة الكيموضوئية مشروط باستمرار المرحلة الكيموحيوية لأن تراكم NADPH_2 وعدم أكسدته يمنع من إرجاعه في السلسلة التركيبية الضوئية وبالتالي توقف العملية.

ثانياً تحويل الطاقة الكيميائية الكامنة إلى طاقة كيميائية قابلة للاستعمال (تنفس):

يعني التنفس الآليات التي تسمح بتحويل الطاقة الكيميائية الكامنة في الجلوكوز إلى طاقة كيميائية قابلة للاستعمال من طرف خلايا العضوية. وتتم عملية التحصل على هذه الطاقة إما في وجود الأكسجين حيث يتفكك فيها الجلوكوز كلياً (تنفس هوائي)، أو في غيابه حيث يتفكك جزئياً (تنفس لاهوائي أو تخمر).

1 في حالة وجود الأكسجين يوضح الجدول الموالي بشكل تفصيلي مراحل وشروط هذه الظاهرة على المستوى الجزيئي:

تذكير بالمكتسبات القبلية:

تتمثل المظاهر الخارجية للتنفس في أخذ الأكسجين من الوسط الخارجي وطرح بالمقابل CO_2 وتحرر طاقة حرارية. وذلك وفق المعادلة التقليدية التالية:



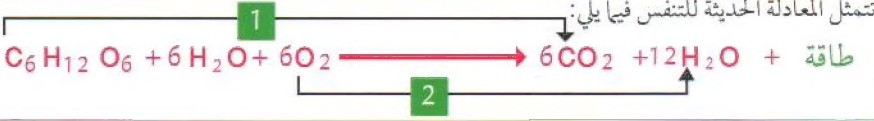
1
إيضاح المظهر
الخارجي للعملية
وشروط حدوثها



2
المقر والبنية

الميتوكوندري:

تحتوي الخلية الحيوانية على كل المكونات فيما عدا الصانعات الخضراء. تتكون الميتوكوندري من غشائين: داخلي وخارجي كما يبينه الشكل أعلاه. ينشئ الغشاء الداخلي إلى الداخل مشكلاً ما يسمى بالأعراف الهدف منها **زيادة سطح الأكسدة التنفسية**. بقية الفراغ يسمى الحشوة أو ستروما وهو عبارة عن سائل يحتوي على مركبات عضوية وإنزيمات تنفسية ومرافقات إنزيمية: ADP , Pi و FAD , NAD
- ما فوق بنية الميتوكوندري: يتكون الغشاء الداخلي من سلسلة نواقل الإلكترونات تسمى **السلسلة التنفسية**، تنتهي بكرية مذنبية ($ATPase$).



3
معادلة التنفس

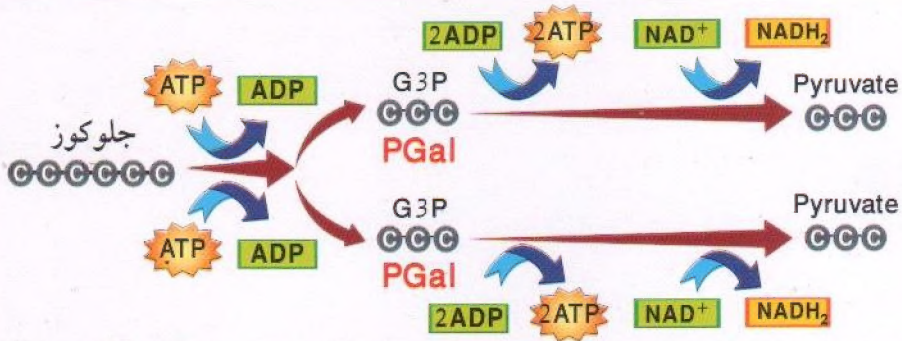
نستخلص من المعادلة وجود تفاعلين:

- 1- تفاعل أكسدة للجلوكوز إلى غاز الفحم يطرح إلى الخارج.
- 2- تفاعل إرجاع للأكسجين إلى ماء أي أن العملية تتطلب امتصاص الأكسجين من الوسط الخارجي. طبيعة التفاعلات الكيميائية في التنفس هي كذلك تفاعلات أكسدة وإرجاع. لا تتطلب عملية التنفس شروطاً خاصة سوى توفر الأكسجين.

أ- التحلل السكري (Glycolyse)

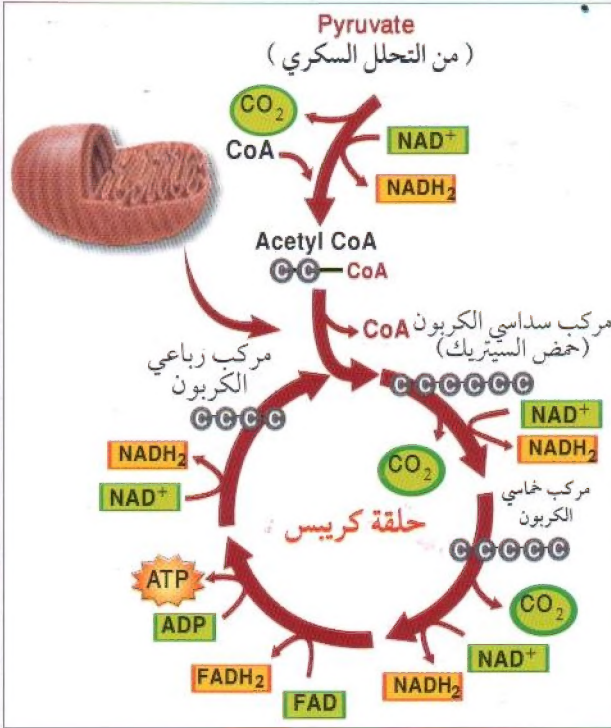
قبل دخول الجلوكوز إلى الميتوكوندري تحدث به سلسلة من التحولات تنتهي إلى تشكيل حمض البيروفيك يطلق على الظاهرة **التحلل السكري** والذي يمكن توضيحه وفق مخطط الصفحة الموالية: يتبين من المخطط أن جزيئة الجلوكوز تنجزاً إلى مركبين يتكون كل منهما من ثلاث ذرات كربون يطلق عليها $PGal$ (فوسفو غليسيرالدهيد) يتطلب ذلك استعمال طاقة تقدر إجمالاً ب $2ATP$.

4
مراحل التنفس



يتحول مركب PGal إلى حمض بيروفيك (Pyruvate) مروراً بمركبات بينية وهي: APG و PEP محرراً طاقة تسمح بتشكيل 2 ATP وإرجاع 2 NAD⁺ إلى 2 NADH₂.

معادلة التحلل السكري: $C_6H_{12}O_6 + 2 (ADP + P_i) + 2 NAD^+ \rightarrow 2 ATP + 2 NADH_2 + 2 \text{ حمض بيروفيك}$



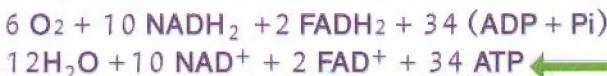
العملية **حلقة كريس** حيث تكون معادلتها كالتالي:



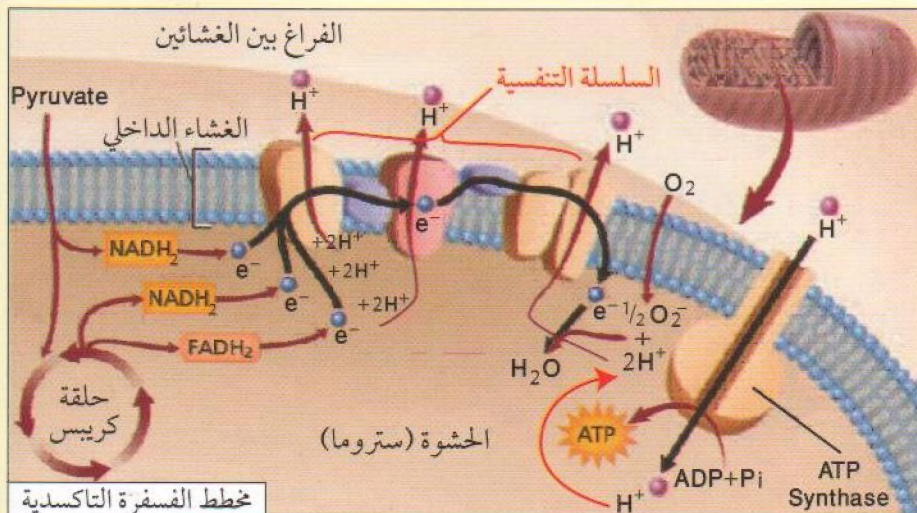
ج- الفسفرة التأكسدية

لقد أظهرت التجارب أن NADH₂ و FADH₂ يتأكسدان عبر سلسلة من النواقل توجد ضمن الغشاء الداخلي للميتوكوندري تسمى **السلسلة التنفسية** حيث تقوم البعض منها باستعمال جزء من طاقة الإلكترونات في ضخ البروتونات إلى الفراغ بين الغشائين بينما ينتهي المطاف بالإلكترونات إلى إرجاع الأكسجين كما يوضحه الشكل في الصفحة الموالية.

يرفّق بالسلسلة التنفسية عملية فسفرة تسمى الفسفرة التأكسدية تسمح بتشكيل جزيء ATP على مستوى الكريات المذنبة حيث تتدفق البروتونات عبرها من الفراغ بين الغشائين العالي التركيز بالبروتونات إلى الستروما لترتبط بجزيئات الأكسجين المرجعة مما يسمح بتركيب جزيئات الماء.

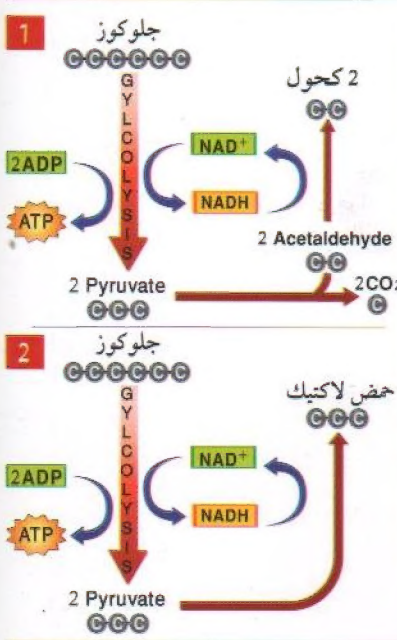


**معادلة
الفسفرة
التأكسدية:**



المرحلة	عدد ATP	عدد NADH ₂	عدد FADH ₂
التحلل السكري	2	2	0
نزع الكربون التأكسدي	/	2	0
حلقة كريس	2	6	2
الحصيلة الإجمالية	4	10	2
الحصيلة الطاقوية بال ATP	4	30	4
= 38 ATP			

1NADH₂ → 3ATP / 1FADH₂ → 2ATP



2 في حالة غياب الأكسجين لاحظنا من خلال معادلة التحلل السكري أن من نتائج هذه العملية والتي تتم في الميول إرجاع $2\text{NAD}^+ + 2\text{NADH}_2$ وتشكل حمض البيروفيك ومن ثم تتأكسد في الميتوكوندري لتعطي 3 جزيئات ATP. لكن في غياب الأكسجين فإن العملية تتوقف هنا ويشكل تراكم NADH_2 الزيادة من حموضة الوسط نتيجة ارتفاع تركيز البروتونات مما يجعله وسطا غير مناسب للنشاط الإنزيمي. وعند الإنسان تسبب له حموضة الدم (Acidose) التي تؤدي به إلى الموت المحتمي. لهذا تلجأ العضوية إلى التخلص من هذه الحموضة بأكسدة NADH_2 إلى NAD^+ وتحويل حمض البيروفيك إما إلى حمض لبن أو كحول وتسمى العملية بالتخمير أو التنفس اللاهوائي وتربح بذلك جزيئتان من ATP الناتجة عن التحلل السكري.

أ- التخمر الكحولي: تلجأ بعض الكائنات الدقيقة مثل فطر الخميرة إلى هذا النوع من التخمرات إلى تحويل حمض البيروفيك أولا إلى مركب أسيتالدهيد بنزع جزيئة ثاني أكسيد الكربون ثم إرجاع هذا المركب إلى كحول عن طريق NADH_2 كما يبين ذلك المخطط 1. يستفاد من هذا النوع من التخمرات في صناعة أنواع الخبز و الكحول الذي يستعمل في صناعة مختلف أنواع الخمر كما يستعمل كمطهر في المجال الطبي ...

ب- التخمر اللبني (التخمر اللاكتيكي) : نفهم جيدا معنى التخمر اللبني عندما نذكر بعض مشتقات الحليب التي نجها مثل الباهورت والجبن واللبن والراب وجبن البيتزا (Cheddar)... والتي هي منتج نشاط بكتيريا تعيش في الحليب، حيث تقوم بتحويل حمض البيروفيك إلى حمض لبن وفق المخطط 2. نلاحظ كذلك حدوث التخمر اللبني عند الإنسان في حالة القيام بجهد عضلي قوي حيث تصبح كمية الأكسجين الموجودة في الدم غير كافية لمسيرة الجهد العضلي وبالتالي لا تحدث أكسدة تامة للجلوكوز في الميتوكوندري، ونتيجة تراكم NADH_2 فإن ذلك يؤدي إلى خطر حموضة الدم لذلك تلجأ الخلايا العضلية إلى التخمر اللبني والذي يؤدي إلى تراكم حمض اللبن فيتسبب في شبه شلل مؤقت وألم حاد للعضلات عند القيام بأدنى حركة خاصة في اليوم الموالي للجهد العضلي القوي. يزول هذا المشكل العضلي تدريجيا بعد تحويل حمض اللبن من طرف الكبد إلى حمض البيروفيك من جديد.

3 المردود الطاقي

يتمثل المردود الطاقي ما تستفيده الخلية من طاقة فعلية في شكل ATP من الطاقة الكلية الكامنة في الجلوكوز. حيث يتم قياس ذلك بالنسبة المئوية. إن الحرق الكلي (الأكسدة التامة) لمول واحد من سكر الجلوكوز خارج العضوية يحرق طاقة حرارية تقدر ب 2861 كيلو جول وذلك وفق المعادلة التقليدية:



أما الأكسدة التامة لنفس الكمية من الجلوكوز داخل الخلية فتعطي 38 ATP. بما أن مول ATP يعطي 30.5 كيلو جول أي تستفيد الخلية من $38 \times 30.5 = 1159$ كيلو جول. وهذا يعني أن المردود الطاقي للخلية يساوي:

$$1160 / 2860 \times 100 = 40.5 \%$$

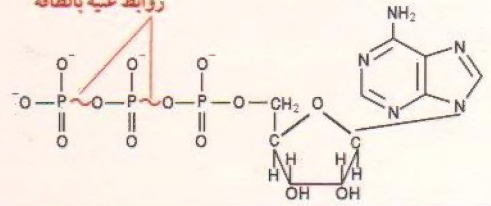
وبالتالي فإن ما تستعمله الخلية فعليا من الجلوكوز هو فقط 40.5 % والباقي (1700 KJ) يطرح في شكل إشعاع حراري يستفيد منه الجسم في تثبيت درجة حرارته. وهو يعتبر أحسن مردود طبيعي مقارنة مع المردود الطاقي لمحركات السيارات والتي تذهب معظم الطاقة المستخرجة من البنزين في شكل حرارة تزيد من تسخين المحركات لهذا يستعمل فيها نظام التبريد. في حين أن الميتوكوندري تستخرج هذه الطاقة ببطء وفي ظل حرارة معتدلة بفضل عمل الإنزيمات.

ج- الحصيلة الطاقيّة للتخمر: ما دام مركب NADH_2 لا يتأكسد في الميتوكوندري وأن التنفس يتوقف عند التحلل السكري، لذلك فإن الحصيلة الطاقيّة لهذه الظاهرة تمثل فقط في 2 ATP.

- لماذا استعمال ATP كمصدر للطاقة بدلا من أي مركب آخر ؟

حسب تسميته أدينوزين ثلاثي الفوسفات (Adenosine Triphosphate)، يتربك من الأدينوزين (سكر ريبوز + أدينين) مرتبط بثلاثة أحماض فوسفورية على التسلسل كما يوضحه الشكل ادناه. وهو أحسن مركب حامل للطاقة تستعمله جميع الكائنات الحية حيث عند تفكك مول واحد منه يحرر طاقة تقدر ب: 30.5 كيلو جول. وهذه الطاقة تأتي أساسا من عملية الفسفرة التأكسدية والتي تتم في مستوى الغشاء الداخلي للميتوكوندري. فعند عبور البروتونات عبر الكريات المذنبة تتحرر طاقة عالية جدا لا يمكن لأي مركب أن يقتنصها بمردود عالي إلا ATP انطلاقا من $\text{ADP} + \text{Pi}$. حيث تكون الروابط بين جزئيات الفوسفات غنية بالطاقة. لذلك يعتبر المورد الأساسي لكل التفاعلات البيوكيميائية التي تحتاج إلى طاقة.

روابط غنية بالطاقة



ما مصدر الطاقة الكامنة ؟ وكيف يتم تحويلها في شكل ATP ؟

خلاصة المجال الثاني:

يلخص الجدول التالي مقارنة بين الظاهرتين، يتبعه رسم تخطيطي يبرز العلاقة بينهما.

المواصفات	التركيب الضوئي	التنفس
المقر	الغشاء الداخلي للتيلاكويد	الغشاء الداخلي للميتوكوندري
التفاعلات الكيموحيوية	$6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{E}$
مرافقات الإنزيم المرجعة	NADP^+	NAD^+ أساسا ثم FAD^+
سلسلة نواقل الإلكترونات	السلسلة التركيبية الضوئية	السلسلة التنفسية
الفسفرة	الفسفرة الضوئية	الفسفرة التأكسدية

نستنتج من خلال المعادلتين أن الظاهرتين متعاكستان ومتكاملتان:

- **متعاكستان:** الأولى بنائية (تركيب الجلوكوز لتخزين الطاقة) والثانية هدمية (هدم الجلوكوز لاستخراج الطاقة).
- **متكاملتان:** نهاية كل ظاهرة هي منطلق للظاهرة الأخرى وأن كل منهما لا تتم إلا بالأخرى.

العلاقة بين التركيب الضوئي و التنفس

